

6. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В. Деформационный структурный переход и акустическая эмиссия в алюминий-магниево-магний сплавах в условиях термомеханического нагружения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. № 3.

7. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.Ю., Колубаев Е.А. Накопление деформации и акустическая эмиссия в алюминий-магний образце, полученном сваркой трением с перемешиванием // *Известия АлтГУ*. 2016, №1. DOI 10.14258/izvasu(2016)1-05

8. Мышляев М.М. Ползучесть полигонизованных структур. – Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения. // М: Наука. 1972.

9. Гудкин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. Зернограничное скольжение и эмиссия решеточных дислокаций в нанокристаллических материалах при сверхпластической деформации // *ФТТ*. 2005, т. 47, № 9.

10. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминий-магний-магний сплавов // *ФММ*. 1996, т. 81, № 1.

11. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al-Mg сплавах // *ФММ*. 1991, № 10.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ АДАПТИВНОЙ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

**Сараев Ю.Н., Лунев А.Г.**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия,  
E-mail: litsin@ispms.tsc.ru;

**Гладковский С.В.**

Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,  
E-mail: gcv@imach.uran.ru;

**Голиков Н.И.**

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия,  
E-mail: n.i.golikov@mail.ru

**Актуальность.**

Повышение требований к эксплуатационным характеристикам сварных конструкций в машиностроении, строительной промышленности, судостроении, трубопроводном транспорте вызвало необходимость применения высокопрочных низколегированных сталей [1]. Основным способом, применяемым при монтаже металлоконструкций, является дуговая сварка, оказывающая существенное влияние на свойства зоны сварного соединения, её структуру и механические характеристики. При этом всегда существует риск возникновения в зоне сварного соединения различных дефектов, природа появления которых разнообразна и труднопредсказуема [2].

Анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам прочности и надежности металлоконструкций ответственного назначения [3,4 и др.], позволяет выделить несколько перспективных направлений исследований, в ходе которых изучаются различные стадии формирования неразъемных соединений, в том числе

стадий возможного поглощения расплавленным металлом водорода из атмосферы дуги [5-6], стадий плавления электрода, учитывающих температуру металла, наличие слоя шлака, характер переноса электродного металла в сварочную ванну и другие технологические особенности [7].

**Цель исследований:** изыскание путей повышения эксплуатационных характеристик в конструкциях ответственного назначения путем установления взаимосвязи влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения, со структурой металла шва и зоны термического влияния, а также характеристиками ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений.

**Методика экспериментального исследования:** для проведения испытаний были изготовлены образцы из стали 09Г2С, полученных ручной дуговой сваркой на режимах постоянного тока (СПТ) и низкочастотной модуляции тока (СМТ). Для изучения структуры сварных швов (СШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) стали 09Г2С использовали оптическую микроскопию, совмещенную с анализатором изображений. В ходе исследований определяли средний размер зерна. Фрактографический анализ изломов различных участков проводили с применением растровой электронной микроскопии.

#### **Результаты и их обсуждение.**

Основной задачей при выполнении исследований, требующей решения при исследовании тепломассопереноса при дуговой сварке, является обоснование условий, при которых происходит формирование неразъемного соединения. Нагрев и охлаждение обрабатываемого изделия вызывают разнообразные физические и химические процессы в самом материале: плавление, перенос электродного металла, кристаллизация расплава, напряжения и деформации, возникающие в зоне неразъемного соединения, неразрывно связаны с энергетическими параметрами процесса сварки, и, в итоге определяют эксплуатационные показатели изделия [8].

Основными показателями тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом являются: частота перехода электродного металла в сварочную ванну в виде отдельных капель, их теплосодержание, длительность их нагрева до момента отрыва от электрода. Для случая сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, важным показателем стабильности тепломассопереноса является коэффициент вариации длительностей коротких замыканий. Кроме того, одним из основных показателей, отражающих изменение во времени нагрев и остывание обрабатываемого металла, может быть термический цикл сварки. Как правило, весь процесс сварки может характеризоваться семейством кривых термических циклов, которые можно получить обработкой результатов тепловизионной съемки.

Ранее было установлено, что на характеристики тепломассопереноса оказывают влияние, не только энергетические характеристики процесса сварки и способ сварки (СПТ или СМТ), но и тип сварочных электродов, включая их химический состав и качество изготовления [9]. Поэтому в рамках настоящей работы изучались микроструктура зон неразъемных соединений, определялись размеры отдельных зерен, как в металле шва, так и в зоне термического влияния. Производилась оценка влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами на характеристики ударной вязкости и трещиностойкости сварных соединений, как основных показателей эксплуатационных характеристик конструкций ответственного назначения.

В ходе испытаний была установлена взаимосвязь энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения, со структурой металла шва и зоны термического влияния. Показано, что импульсный характер изменения энергетических параметров режима сварки оказывает благоприятное воздействие на теплосодержание расплава сварочной ванны и условия её кристаллизации.

Испытания металла ЗТВ сварных соединений стали 09Г2С на статическую трещиностойкость показали, что все исследуемые соединения имеют высокие показатели во всем диапазоне температур: начиная от +20°C, и заканчивая -60°C, даже при наличии дефектов в виде усталостных трещин. В целом проведенные испытания подтвердили эффективное влияние режимов и способа сварки на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений из низкоуглеродистых сталей при пониженных климатических температурах.

### Выводы.

1. Выполненные исследования подтвердили предварительную гипотезу о влиянии на структуру и свойства неразъемных соединений из низкоуглеродистых сталей энергетических параметров режимов их формирования различными способами дуговой сварки.

2. Характеристики ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений, полученных с применением режимов СМТ по сравнению со сварными соединениями полученными в режиме СПТ, выше для всех диапазонов температур испытаний от +20°C до - 60°C

3. Выявлена взаимосвязь между макро- и микростроением изломов ударных образцов сварных соединений и уровнем их ударной вязкости, проявляющаяся в существенном снижении значений KCV при смене доминирующего механизма разрушения от вязкого ямочного к квазисколу и хрупкому сколу в условиях понижения температуры испытаний от комнатной до – 60 °С.

4. Испытания металла ЗТВ изученных сварных соединений стали 09Г2С на статическую трещиностойкость выявили возможность их использования при комнатной и пониженной температурах в изделиях и элементах конструкций ответственного назначения при наличии дефектов в виде усталостных трещин.

5. Установлено эффективное влияние сварки с модуляцией тока по сравнению со сваркой на постоянном токе на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений из низкоуглеродистых сталей при пониженных климатических температурах.

Работа выполнена в 2017 году за счет средств гранта РФФИ по проекту №16-19-10010.

### Список литературы

1. Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2 томах. - Т. 1. / Ред. кол.: И.К. Походня (предс.) и др.; НАН Украины. — К.: Академперіодика, 2013. — 583 с., 4 с. ил. ISBN 978-966-360-235-6. ISBN 978-966-360-236-3 (Т. 1).
2. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – с. 14 – 19.
3. Shiga C.: Problems in welded joints and systematic approach to their solution in STX21 project Science and Technology of Welding and Joining, 2000, vol. 5, no. 6, pp. 356-364.
4. Zenitani S., Hayakawa N., Yamamoto J., Hiraoka K., Morikage Y., Kubo T., Yasuda K., Amano T.: Development of new Low Transformation-Temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds, Proceedings of 2002 Symposium for Welded Structures of the Japan Welding Society, Osaka, 2002, pp. 346-353.
5. Yosuke Ogino & Yoshinori Hirata Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW. Doc. IIW-2533, recommended for publication by Study Group SG-212 "The

Physics of Welding”. Welding in the World. Published online: 25 January 2015. DOI 10.1007/s40194-015-0221-8.

6. Th. Kannengiesser, Th. Lausch, A. Kromm. Effects of heat control on the stress build-up during high-strength steel welding under defined restraint conditions // Welding in the World, N<sup>o</sup> 07/08. – 2011. Vol. 55/ - pp. 58-65.

7. Сараев Ю.Н. и др. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Глава 5 в книге: Научные технологии в проектах РФ. Сибирь / Под редакцией С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Издательство НТЛ, 2017. – 428 с. ISBN 978-5-89503-607-5. С. 134-202.

8. Сараев Ю.Н. Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса / Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С., Гордынец А.С., Нестерук Д.А., Хайдарова А.А., Чинахов Д.А., Семенчук В. М. // Сварочное производство. – 2018. - №2. – с. 3-13.

9. Сараев Ю.Н. Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса / Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С., Гордынец А.С., Нестерук Д.А., Хайдарова А.А., Чинахов Д.А., Семенчук В. М. // Сварочное производство. – 2018. - №2. – с. 3-13.